

HORVÁTH ZALÁN

# Mikrokozmosz – világunk építőköveinek kutatása



*Horváth Zsolt  
fizikus,  
az MTA rendes tagja*

Az anyagi világ szerkezetének megismerése több mint kétezer éve foglalkoztatja az emberiséget. A 20. században a kvantumelmélet és a relativitáselmélet megalkotása után hatalmas fejlődés következett be. Előbb az anyagot építő atomokat ismerték meg, majd az atommagokat kezdték vizsgálni. Olyan fontos kérdéseket kellett megválaszolni, mint: Mi tartja össze a magot alkotó részecskéket?

A század közepén egyre több elemi részecskét fedeztek fel, s újabb kérdések születtek: Hogyan osztályozzuk az elemi részecskéket? Elemi vagy összetett minden részecske? Melyek az alapvető erők a természetben? 1968–1975 között mindezen kérdéseket egy egységes elmélet keretein belül választották meg a fizikusok, ez a Standard Modell.

Az évszázad utolsó negyedében a Standard Modell majdnem összes előrejelzését igazolták. Vannak azonban még megválaszolatlan kérdések, például: Mi a részecskék tömegének eredete? Létezik-e egy mindennek fölött álló, az egész természetet leíró elmélet, a mindenség és a „mindentudás” elmélete?

1943-ban született. 1967-ben végzett az ELTE Természettudományi Karának fizikus szakán. 1991-ben a fizikai tudomány doktora lett, 1998-tól az MTA levelező, 2004-től rendes tagja.

Pályáját a Nehézipari Műszaki Egyetem tanársegédjeként kezdte, 1971-től az ELTE TTK Elméleti Fizika Tanszékén dolgozott; 1993–2001 között mint tanszékvezető egyetemi tanár. 2001-től a Fizika Doktori Iskolát vezeti az ELTE-n.

Számos tanulmányutat tett, többek között vendégprofesszor, illetve vendégkutató volt Írországból, Olaszországból, Németországból, Angliából és Franciaországból. Kiterjedt oktatói tevékenységet folytat.

Több bizottság és kuratórium tagja, az MTA Fizikai Osztályának elnöke, a Részecskefizikai Bizottság tagja. Tudományos publikációinak száma 81, melyekre több mint ezer független hivatkozás érkezett.

Főbb kutatási területei: az elméleti elemi részecskefizika, a kvantumtérelmélet, a húr- és szuperhúr elméletek, valamint a hozzájuk kapcsolódó konform invariáns elméletek vizsgálata.

## Történeti bevezetés



Démokritosz (i. e. 460–370)

Az a gondolat, hogy az anyag alapvető „építőkövekből” épül fel, több mint kétezer éves. Az építőkövekről azt feltételezték, hogy egyszerűek és szerkezet nélküliek: Démokritosz például i. e. 350-ben így gondolkodott: „Az örökké való dolgok természete végtelen számú kis részecskékből áll [...] a részecskék olyan kicsik, hogy felfoghatatlanok számunkra, és a legkülönbözőbb alakzatokat öltik, és mindenféle formájúak és különböző méretűek. Belőlük, mint az elemekből (föld, víz, tűz, levegő) állítódnak össze és erednek a látható és felfogható testek ...”

A részecskék elméletének történetét a következő táblázat foglalja össze:

1564–1642	Galilei a modern fizika atyja. Alapvető gondolata, hogy a feltételezéseket a tapasztalatból levont elméletekkel kell helyettesíteni.
1642–1727	Newton kifejleszti a mechanika alapelveit.
1873	Maxwell megadja az elektromos és mágneses jelenségek egységes leírását.
1897	Thomson megméri az elektront, és atommodellt alkot.
1900	Planck: a kvantumelmélet születése.
1911	Rutherford megalkotja az atom máig ismert modelljét.
1905–1915	Einstein megalkotja a speciális és általános relativitáselméletet.
1919	Rutherford bizonyítja a proton létezését.
1924–1928	A kvantummechanika megszületése: de Broglie, Pauli, Schrödinger, Heisenberg, Dirac; az atomok, molekulák fizikájának és kémiaijának megalapozása.
1930	Pauli javasolja a neutrínót a radioaktív bomlások megmagyarázására.
1932	Chadwick: a neutron felfedezése.
1932	A pozitron felfedezése, Dirac: antirészecskék.
1933–1934	Fermi megalkotja a gyenge kölcsönhatások elméletét. Yukawa feltételezi, hogy a magot alkotó részecskék kötéséért egy $\sim 200m_e$ tömegű mezon felelős. A magfizika születése.
1937	A kozmikus sugárzásban $\sim 200m_e$ tömegű részecskét fedeznek fel, de ez nem Yukawa pionja, hanem az elektronhoz hasonló, nála kétszázszorosan nagyobb tömegű részecske, a müon. Erre mondta Rabi: „Kinek kell ez?” A részecskefizika születése.
1947	Megtalálják az erősen kölcsönható mezont, a piont a kozmikus sugárzásban.
1947	A fizikusok alkalmassá teszik a relativisztikus kvantumelektrodinamikát a részecskék elektromágneses tulajdonságainak kiszámolására.
1948	Berkeleyben gyorsító kísérletben piont állítanak elő.
1949	A $K^+$ felfedezése bomlásai alapján.
1950	A semleges $\pi^0$ felfedezése.
1951	Kozmikus sugárzásban a $\Lambda^0$ és $K^0$ felfedezése.
1952	A buborékkamra felfedezése: Glaser. A Cosmotron 1,3 GeV gyorsító elindítása a Brookhaven Laboratóriumban.
1953	A „részecske-robbanás” elindulása, részecskék sokaságát fedezik fel.
1953–1957	A proton és neutron töltésszerkezetének megmérése azt sugallja, hogy e részecskéknek belső szerkezete van.
1954	A CERN megalapítása.

1954	Yang és Mills: mértékelméletek.
1957	Schwinger, Bludmen és Glashow: első kísérlet a gyenge és elektromágneses kölcsönhatás egyesítésére.
1961	Csoportelméleti módszerek a részecskék osztályozására.
1962	Kísérletileg bizonyítják, hogy két különböző neutrínó van.
1964	Gell-Mann és Zweig feltételezik a kvarkok létezését.
1964	Glashow és Björken feltételezi egy negyedik „charm” (csinos) kvark létezését.
1967	Weinberg és Salam az elektromágneses és gyenge kölcsönhatások egyesítésére modellt javasol, új részecskéként a $Z^0$ és a Higgs-mezon létezését prognosztizálják.
1968–1969	Björken és Feynman rámutat, hogy a kísérletek igazolni látszanak a kvarkok létezését a protonon belül.
1973	Az erős kölcsönhatások kvantum-térelméletét fogalmazza meg Fritsch és Gell-Mann.
1974	Iliopoulos összefoglalja a Standard Modell összes elemét egyetlen előadásban.
1974	Felfedezik a $J/\psi$ részecskét, amely egy $c\bar{c}$ állapot.
1976	Felfedezik a $D_0$ mezont: $\bar{u}c$ .
1976	Perl felfedezi a $\tau$ leptont.
1977	Ledermann felfedezi a B bozont.
1978	A $Z^0$ által közvetített kölcsönhatás egyértelműen megalapozottá válik: Prescott és Taylor.
1983	Rubbia és Van der Meer észleli a CERN-ben a $W^+$ , $W^-$ és $Z^0$ részecskéket $\bar{p}p$ ütközésekben.
1989	SLAC- és CERN-mérések igazolják, hogy csak három generáció van.
1995	Fermilab (USA): felfedezik a hatodik t kvarkot, ami 175 GeV tömegű – nem lehet megérteni, hogy miért ilyen nagy a tömege.

## Hogyan épül fel a körülöttünk lévő világ?

Ma már tudjuk, hogy a világegyetem összes anyaga közel száz különböző típusú atomból épül fel, mindegyik negatív töltésű elektronokból áll, amelyek a pozitív töltésű magok körül keringenek. A mag továbbá nukleonokból áll: pozitív protonokból és semleges neutronokból. Mindezen összetevőket a fizikusok anyagrészecskéknek nevezik.

Az elektronnak nincs belső szerkezete. A protonok és neutronok összetett részecskék, mindegyik három kvarkból áll. Az elektronhoz hasonlóan a kvarkoknak sincs belső szerkezete. Csak kétfajta kvark szükséges ahhoz, hogy felépítsük a protont és a neutron: az u (up = fel) és a d (down = le) kvark. Még egy további szerkezet nélküli részecskét kell hozzávinnünk, hogy teljes legyen a kép: egy semleges nagyon könnyű részecskét, a neutrínót. Ez fontos szerepet játszik azokban a reakciókban, amelyekben a neutronok protonná alakulnak át, és fordítva. Ezek a reakciók alapvető jelentőségűek a radioaktív bomlások során és a Nap energiatermelésében.

### SLAC:

a Stanford Linear Accelerator Center (Stanfordi Lineáris Gyorsító Központ) a világ egyik vezető részecskefizikai kutató laboratóriuma. 1962-ben alapították, a Stanfordi Egyetemen, Kaliforniában található. Az itt felépített lineáris gyorsító segítségével végrehajtott mélyen rugalmatlan  $e p$  szórás kísérletek tették híressé. Ezek segítségével sikerült meggyőzően feltárni a proton szerkezetét és igazolni a kvark hipotézist az 1966 és 1978 között végzett kísérletekben. Ugyanitt fedezték fel az  $J/\psi$  mezont és a  $\tau$  leptont.

### $J/\psi$ mezon:

az első olyan mezon, amely a  $c$  kvark és az anti  $c$  kvark kötött állapota. Spinje egységnyi. Tömege:  $m = 5520,67 \times 10^{-30}$  kg.

### $\tau$ lepton

az elektronnal a tömegén kívül mindenben azonos tulajdonságokkal rendelkező fermion. Tömege:  $m_\tau = 3167,77 \times 10^{-30}$  kg. Gyengén bomlik például:  
 $\tau \rightarrow e + \bar{\nu}_e + \nu_\tau$ ;  $\tau \rightarrow \mu + \bar{\nu}_\mu + \nu_\tau$ .



Newton dolgozószobája

Összesen ez a négy részecske kell tehát ahhoz, hogy felépítsük a közös anyagilag világunk magunk körül. Ezen túl vannak az anyagnak kevésbé közös formái, amelyek léteznek, de nem látjuk őket: a kozmikus sugárzás, amely az űrből érkezik, valamint a nagyenergiás anyag, amit a laboratóriumainkban hozunk létre, és mindezek „tükörképe”, az antianyag. Ezek leírását és megmagyarázását tűzik maguk elé az elemi részecskék fizikájával foglalkozó fizikusok.

## A standard modell – ahogy ma a részecskefizikát látjuk

A fizika elsődleges célja, hogy egységes módon értse meg a természet csodálatos változatosságát. Minden múltbeli nagy eredmény e cél felé vezető újabb lépés volt:

- › az égi és a földi mechanika egyesítése (Newton, 17. század);
- › az elektromosság és a mágnesesség elmélete (Maxwell, 19. század);
- › a téridő geometriájának és a gravitáció elméletének egyesítése (Einstein, 1905–1915);
- › a kémia és az atomfizika megértése a kvantummechanika kialakulásával (1920-as évek).

Van-e mód további egyesítésre? Igen: a részecskefizika Standard Modellje egyesíti az elektromágneses és gyenge kölcsönhatásokat, azokat az erőket, amelyek a radioaktív kölcsönhatásokért felelősek, és hasonló módon írja le az erős kölcsönhatásokat, azokat az erőket, amelyek a kvarkokat tartják a protonon és a neutronon belül, és amelyek a protonokat és neutronokat tartják össze a magokban.

Több mint húsz fizikus kapott Nobel-díjat olyan eredményért, amely megalapozta a Standard Modellt, a kvantumelektrodinamikától kezdve (1965) a neutrínó és a tau részecske felfedezéséig (1995), legutoljára pedig alapvető elméleti munkájukért Gerard 'tHooft és Martin Veltman (1999) holland fizikusokat díjazták.

A Standard Modell relativisztikus kvantumtérelmélet. Alapvető elemei terek, köztük az elektrodinamika elektromos és mágneses terei. E terek kis fodorzódásai energiát és impulzust hordoznak helyről helyre. A kvantummechanikából pedig az következik, hogy ezek a fodorok kis csomagokat, kvantumokat alkotnak, amelyeket a laboratóriumban elemi részecskékként ismerünk fel. Például az elektromágneses tér kvantuma az a részecske, amit fotonnak nevezünk.

A részecskefizika szintjén a különböző kölcsönhatásokban részecskék keletkeznek és tűnnek el, elbomlanak és átalakulnak. Például egy szabad neutron elbomlik egy elektronra, egy protonra és egy **antineutrínóra**. A bomlások során a nehezebb részecskék könnyebbekre bomlanak el, ha ez lehetséges. Mi szabályozza ezeket a bomlásokat?

Minden folyamat során kötelezően érvényesülnie kell az alapvető meg-

### Antineutrínó:

a közel nulla tömegű semleges neutrínó antirészecskéje, csak gyenge kölcsönhatásokban vesz részt. Radioaktív bomlásokban a megfelelő leptonnal együtt keletkezhet. Jele:  $\bar{\nu}$ .

maradási törvényeknek: az energia-, az impulzus- és az **impulzusmomentum**-megmaradásnak. Természetesen a speciális relativitáselmélet következtében a tömeg és az energia ekvivalens, így például a neutron, melynek tömege nagyobb, mint a proton, az elektron és az antineutrínó együttes tömege, elbomolhat ezekre a részecskékre. Miért nem bomlik el mégis minden részecske a legkönnyebbre? Mert még más megmaradási törvények is vannak. Ilyen például az elektromos töltés megmaradása, vagy a protonhoz és neutronhoz rendelhető „bariontöltés” megmaradása. Az utóbbi miatt nem bomolhat el a proton például pozitronná és fotonná. Bizonyos mennyiségek minden kölcsönhatás folyamán megmaradnak, mások csak bizonyos kölcsönhatások esetén.

A részecskéket jellemzőik alapján osztályozzuk. Alapvető tulajdonságaik a tömegük, a különböző töltéseik és a spinjük.

A spin a részecskék saját belső impulzusmomentuma. Egy pörgettyűnek is van impulzusmomentuma, perdülete, ez annál nagyobb, minél gyorsabban pörög. A részecskék esetében azonban ez egy saját megváltoztathatatlan tulajdonság. Az impulzusmomentum a kvantumelméletben csak a Planck-állandó,  $\hbar = 1,05 \times 10^{-34}$  Js többszöröse lehet. Az elemi részecskék spinje vagy  $\hbar$  egész számú többszöröse lehet – ezek a *bozonok*, vagy  $\hbar/2$  páratlan számú többszöröse – ezek a *fermionok*. Az anyagot alkotó részecskék fermionok, az erőket közvetítő részecskék bozonok.

### Impulzusmomentum:

a testek forgási állapotára jellemző dinamikai mennyiség. Például egy adott tengelyre merőleges síkbeli  $a$  tengely körül  $r$  sugarú körpályán mozgó  $v$  sebességű  $m$  tömegű pont impulzusmomentuma:  $N = rmv$ . Egy adott tengely körül  $\omega$  szögsebességgel pörgő test impulzusmomentuma:  $N = \Theta\omega$ , ahol  $\Theta$  a testnek a tengelyre vonatkoztatott tehetetlenségi nyomatéka. Az impulzusmomentum a kvantumelméletben csak kvantált értékeket vehet fel. Lehetséges értékei a  $\hbar = 1,05 \times 10^{-34}$  Js Planck-állandó egész vagy félegész számú többszörösei lehetnek.

Fermionok			Anyagi összetevők spin = 1/2, 3/2, 5/2		
Leptonok spin = 1/2			Kvarkok spin = 1/2		
Megnevezés	Tömeg GeV/c <sup>2</sup>	Töltés	Megnevezés	Tömeg GeV/c <sup>2</sup>	Töltés
$\nu_e$ elektron-neutrínó	$< 1 \times 10^{-8}$	0	u up	0,003	2/3
elektron	0,000511	-1	d down	0,006	-1/3

A fermionok első generációja

A részecskefizika Standard Modellje magában foglalja minden tudásunkat az alapvető részecskékről. Leírja az anyagot alkotó részecskéket és azokat a részecskéket, amelyek az erőket közvetítik. Az erőket a közvetítő részecskék kicserélése hozza létre.

Az elektromágneses erőt például a proton és az elektron között fotonok (a fény részecskéinek) kicserélődése adja. A gyenge kölcsönhatásokat közvetítő bozonok a  $W^+$ ,  $W^-$  és  $Z^0$  részecskék. Az erős kölcsönhatásokat a gluonok kicserélődése hozza létre (glue = ragasztó). Nyolcfajta gluon van. Mindezen részecskék egységnyi spinűek, az általuk közvetített erők mégis nagyon különböző tulajdonságúak.

Az anyagot alkotó részecskék három négytagú családot, *generációt* alkotnak, amelyek csak a tömegükben különböznek. A minket körülvevő összes anyag a legkönnyebb generáció elemeiből épül fel.

Ezek az u és a d kvark, az elektron és az elektron-neutrínó. A másik két család csak nagyenergiás ütközések során jön létre (bár mindegyik neutrínó

### Erős kölcsönhatások:

az atommagot alkotó részecskéket (nukleonokat) összetartó erők. Az erős kölcsönhatások közvetítő részecskéi a gluonok. A gluonok csak a színtöltéssel rendelkező részecskékkal vannak kölcsönhatásban. Színtöltést hordoznak mind a kvarkok, mind pedig a gluonok.





## A bozonok

**Színtöltés:**

az erős kölcsönhatásban részt vevő kvarkokra és gluonokra jellemző fizikai tulajdonság. Képletesen a kvarkoknak piros, zöld és kék töltése van. A természetben található szabad részecskék szintelenek. Ez kétféle módon valósulhat meg, vagy egy adott színű kvark és antikvark alkot ilyen állapotot (mezon), vagy három különböző színű kvark áll össze („piros + zöld + kék = fehér”) (barion). Az erős kölcsönhatásokat közvetítő gluonok csak a színes részecskékkel lépnek kölcsönhatásba.

**Mezon:**

az erős kölcsönhatásokban részt vevő egész spinű részecske (bozon).

**B-mezonok:**

a *b* kvarkot tartalmazó mezonok:  $B^+$ ,  $B^-$ ,  $B^0$ ,  $B^0$ ,  $B_s^0$ ,  $B_s^0$ ,  $B_c^+$ ,  $B_c^-$ . Ezek a részecskék kvark–antikvark kötött állapotok:  $u\bar{b}$ ,  $b\bar{u}$ ,  $d\bar{b}$ ,  $b\bar{d}$ ,  $s\bar{b}$ ,  $b\bar{s}$ ,  $c\bar{b}$ ,  $b\bar{c}$  rendre.

Tömegeik:

$$m^+ = m^- = 9410,85 \times 10^{-30} \text{ kg},$$

$$m^0 = 9411,4 \times 10^{-30} \text{ kg},$$

$$m_s^0 = 9572,18 \times 10^{-30} \text{ kg},$$

$$m_c^+ = m_c^- = 11,4 \times 10^{-27} \text{ kg},$$

spinjük nulla.

**D-mezonok:**

a *c* kvarkot tartalmazó mezonok:  $D^+$ ,  $D^-$ ,  $D^0$ ,  $D^0$ ,  $D_s^+$ ,  $D_s^-$ . Ezek a részecskék kvark–antikvark kötött állapotok:  $c\bar{d}$ ,  $d\bar{c}$ ,  $c\bar{u}$ ,  $u\bar{c}$ ,  $c\bar{s}$ ,  $s\bar{c}$  rendre.

Tömegeik:

$$m^+ = m^- = 3332,33 \times 10^{-30} \text{ kg},$$

$$m^0 = 3323,77 \times 10^{-30} \text{ kg},$$

$$m_s^+ = m_s^- = 3509,17 \times 10^{-30} \text{ kg},$$

spinjük nulla.

Gyenge + elektromágneses spin = 1			Erős (szín) spin = 1		
Megnevezés	Tömeg GeV/c <sup>2</sup>	Elektromos töltés	Megnevezés	Tömeg GeV/c <sup>2</sup>	Elektromos töltés
$\gamma$ foton	0	0	<i>g</i> gluon	0	0
$W^-$	80,4	-1			
$W^+$	80,4	+1			
$Z^0$	91,187	0			

hosszú életű). Míg az elektronnak egységnyi negatív elemi elektromos töltése van, a neutrínó pedig elektromosan semleges, az *u* kvark kétharmadnyi pozitív, a *d* kvark pedig egyharmadnyi negatív töltést hordoz.

Mindegyik anyagrészecskének van antirészecske-partnere, melynek tömege megegyezik a részecskéével, de minden töltése ellentétes előjelű. Részecske–antirészecske ütközésekor általában erőhordozó részecskék jönnek létre, például elektron és pozitron ütközésekor fotonok keletkeznek.

Az **erős kölcsönhatásban** részt vevő részecskéket hadronoknak nevezzük. Hadron például a proton és a neutron, vagyis az atommag alkotói. A kvarkokat a gluonok által hordozott erő tartja össze a hadronok belsejében.

Minden kvark hordoz egy úgynevezett **színtöltést**, amely három lehetséges értéket vehet fel. A gluonoknak is van ilyen töltésük. A gluontér csak a színtöltéssel rendelkező részecskékkel van kölcsönhatásban (hasonlóan ahhoz, ahogy az elektromágneses tér csak az elektromosan töltött testekkel van kölcsönhatásban). Mivel a gluonok önmaguk is színesek, így közöttük is hat az erős kölcsönhatás (szemben az elektromágneses térrel, amely semleges, így az elektromágneses tér erővonalai szétterülhetnek), ez a kölcsönhatás összeragasztja a gluontér erővonalait, és a kvarkokat egy gluoncsepp börtönébe zárja.

Eddigi tapasztalataink alapján csak színsemleges és egész elemi elektromos töltésű részecskéket látunk szabadon a természetben. Ha két kvarkot el akarunk távolítani egymástól, ezek magukkal húzzák a gluonteret, amelynek energiája egyre nagyobb lesz.

Ha ez az energia eléri egy kvark–antikvark párkeltéshez szükséges energiát, akkor a pár keletkezése után a gluontérfonál elszakad, és két színsemleges új részecskén keletkezik.

A természetben előforduló színsemleges állapotok a következők:

- kvark–antikvark állapotok: **mezonok**;
- három kvark-állapotok: **barionok** (például proton, neutron);
- három antikvark-állapotok: antibarionok.

Az erős kölcsönhatásokat leíró elméletet kvantum-színdinamikának nevezzük.

Az atommag belsejében is különálló nukleonokat látunk, amelyek három kvarkból állnak. Ennek az az oka, hogy a gluoncsepp felületi feszültsége olyan nagy, hogy nem engedi a nukleonokat összeolvadni. A nukleo-

Szimbólum	Név	Felépítő kvarkok	Elektromos töltés	Tömeg GeV/c <sup>2</sup>	Spin
$\pi$	pion	$u\bar{d}$	+1	0,140	0
$K^-$	kaon	$s\bar{u}$	-1	0,494	0
$\rho^+$	rho	$u\bar{d}$	+1	0,770	1
$B^0$	B-zero	$d\bar{b}$	0	5,279	0
$\eta_c$	eta-c	$c\bar{c}$	0	2,980	0

**K-mezonok:**

ritka mezonok:  $K^+$ ,  $K^-$ ,  $K^0$ ,  $K^{\bar{0}}$ . Ezek a részecskék kvark–antikvark kötött állapotok:  $u\bar{s}$ ,  $s\bar{u}$ ,  $d\bar{s}$ ,  $s\bar{d}$  rendre. Tömegeik:  $m^+ = m^- = 880,806(24) \times 10^{-30}$  kg,  $m^0 = 887,138(34) \times 10^{-30}$  kg, spinjük nulla.

**Mezonok**
**Barionok és antibarionok**

Szimbólum	Név	Felépítő kvarkok	Elektromos töltés	Tömeg GeV/c <sup>2</sup>	Spin
$p$	proton	$uud$	1	0,938	1/2
$\bar{p}$	anti-proton	$\bar{u}\bar{u}\bar{d}$	-1	0,938	1/2
$n$	neutron	$udd$	0	0,940	1/2
$\Lambda$	lambda	$uds$	0	1,116	1/2
$\Omega^-$	omega	$sss$	-1	1,672	3/2

**Bariontöltés:**

az erősen kölcsönható fermionokhoz, barionokhoz rendelt megmaradó mennyiség. Értéke a protonra és a neutronra 1, az antiprotonra és az antineutronra –1. A kvarkok bariontöltése egyharmad. A természetben szabadon csak egész bariontöltésű részecskék fordulnak elő. A bariontöltés nagy pontossággal megmarad, ezért nem bomlik el a proton. Az eddigi mérések alapján a proton élettartama nagyobb, mint  $10^{32}$  év, ami messze meghaladja az Univerzum életkorát.

 **$\Lambda^0$ :**

ritka barion. Erősen kölcsönható fermion. Három kvark kötött állapota:  $u d s$ . Tömege:  $m_\Lambda = 1988,885(8) \times 10^{-30}$  kg. Gyengén bomlik, fő bomlási módjai:  $\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^-$ ,  $\Lambda^0 \rightarrow n + \pi^0$ .

nokat a magban az eredő erős kölcsönhatás tartja össze, amelyet Hideki Yukawa jól leírt pionok, kvark–antikvark párok cseréjével, valójában azonban ekkor is a gluonok cseréje játszik fontos szerepet.

A kötés ahhoz hasonlóan jön létre, mint a semleges atomokat a molekulákban tartó elektromágneses eredetű erő esetén. A másik két családba az s (ritka), c (csinos) kvarkok, a **müion** és a müion-neutrínó, illetve a b (bottom = alsó), t (top = felső) kvarkok, a tau-részecske és a tau-neutrínó tartozik.

A t kvarkot 1995-ben fedezték fel, ez a legnagyobb tömegű ismert elemi részecske, tömege a proton tömegének 175-szöröse. Az erős kölcsönhatás tiszteletben tartja a kvarkok egyéniségét, erős kölcsönhatások során egyik kvarktípus sem alakulhat át a másikba. Kvark–antikvark párok azonban mindig keletkezhetnek és eltűnhetnek, ha elegendő energia áll rendelkezésre. Így valójában a nukleoncsepp belsejében nemcsak a töltést meghatározó kvarkokat és gluonokat, hanem kvark–antikvark párokat is találhatunk.

Lehetséges-e olyan erősen összenyomni ezeket az összetett részecskéket, hogy sok kvarkot és gluont tartalmazó óriáscsepp, egy új anyagforma: a kvark-gluon plazma keletkezzen?

Ehhez egyszerre kell sok nukleont összeütköztetni. Ilyen kísérletek folynak jelenleg az Egyesült Államokban, ahol a **RHIC-kísérlet**ben aranymagokat ütköztetnek nagy energián. A legújabb eredmények arra utalnak, hogy közel állunk az anyag ezen új állapotának a felfedezéséhez.



A fermionok második és harmadik generációja

### $\Sigma$ :

ritka barion. Erősen kölcsönható fermion. Három lehetséges elektromos töltése van:  $\Sigma^+$ ,  $\Sigma^0$ ,  $\Sigma^-$ . Három kvark kötött állapota: u u s, u d s, d d s.

Tömegeik:

$$m^+ = 2120,24(5) \times 10^{-30} \text{ kg},$$

$$m^0 = 2126,077(8) \times 10^{-30} \text{ kg},$$

$$m^- = 2134,647(5) \times 10^{-30} \text{ kg}.$$

A  $\Sigma^+$  és  $\Sigma^-$  gyengén bomlik, fő bomlási módusaik:

$$\Sigma^+ \rightarrow p + \pi^0, \Sigma^+ \rightarrow n + \pi^+,$$

$$\Sigma^- \rightarrow n + \pi^-.$$

A  $\Sigma^0$  elektromágnesesen bomlik:  $\Sigma^0 \rightarrow \Lambda^0 + \gamma$ .

### $m_e$ :

az elektron tömege, értéke:

$$9,10938188(72) \times 10^{-31} \text{ kg}.$$

### $m_p$ :

a proton tömege, értéke:

$$1,67262158(13) \times 10^{-27} \text{ kg}.$$

### Müion:

az elektronnal a tömegén kívül mindenben azonos tulajdonságokkal rendelkező fermion.

Tömege:  $m_\mu =$

$$188,353102(4) \times 10^{-30} \text{ kg}.$$

Gyengén bomlik.

### RHIC-kísérlet:

a Relativistic Heavy Ion Collider (Relativisztikus Néhézion Ütköztető) 2000-ben kezdett működni a Brookhaven Nemzeti Laboratóriumban (New York, Long Island).

A berendezésben két nagy energiájú aranyion nyalábot ütköztetnek. A cél a hadronanyag egy elméletileg megjósolt új állapotának, a kvark-gluon plazmának a felfedezése.

Leptonok spin = 1/2			Kvarkok spin = 1/2		
Megnevezés	Tömeg GeV/c <sup>2</sup>	Töltés	Megnevezés	Tömeg GeV/c <sup>2</sup>	Töltés
$\nu_\mu$ müion neutrínó	< 0,0002	0	C charm	1,3	2/3
$\mu$ müion	0,106	-1	S strange	0,1	-1/3
$\nu_\tau$ tau neutrínó	< 0,02	0	t top	175	2/3
$\tau$ tau	1,7771	-1	b bottom	4,3	-1/3

A családokban előforduló **leptonok** (például elektron és **elektron-neutrínó**) szintelenek, és nincsenek kölcsönhatásban a gluonokkal. Ezért voltak a nagyenergiás elektronok alkalmasak a proton szerkezetének letapogatására. Ezek az elektron-proton szórási kísérletek messzemenően igazolták a kvarkok létezését.

Az elektromágneses kölcsönhatás a részecskék elektromos töltésével és mágneses nyomatékával kapcsolatos. Az elektronokat a magokhoz az elektromágneses erő köti, amelyet a fotonok cseréje közvetít. Így jönnek létre a semleges atomok és molekulák. Ha egy részecske és antirészecske találkozik, átalakulhatnak fotonokká (szétsugározhatnak).

Például a semleges  $\pi^0$  részecske egy kvark–antikvark pár kötött állapota, ezért van elektromágneses bomlása két fotonba. Ha a természetben azonos mennyiségű részecske és antirészecske volna jelen, nem lennének a világegyetemben anyagszigetek (csillagok, galaxisok), minden anyag sugárzássá alakulna át.

A fizikusok egyik alapvető, máig teljesen megválaszolatlan kérdése: Mi okozza a világban azt az aszimmetriát, hogy döntően csak anyag van jelen, és nincsen antianyag sehol? Eltekintve azoktól a kísérletektől, például a CERN-ben, ahol az antianyagot mesterségesen előállítják.

Az elektromágneses kölcsönhatást a kvantumelektrodinamika írja le. Ez az elmélet képes ma a legprecízebb előrejelzésekre. Például igen nagy pontossággal meg lehet mérni az elektron és a müion mágneses nyomatékát, továbbá ellenőrizni lehet részletes kvantumelektrodinamikai számolással, hogy egyezik-e az elméleti eredmény a kísérleti eredményekkel. A fotonterrel való kölcsönhatás következtében e részecskék mágneses nyomatéka az úgynevezett anomális járulékkal módosul. Ennek értéke az elektronra a legújabb mérések szerint:

$$a_1 = (2m_1\mu_1 / eh) - 1$$

$$a_e^{\text{kis}} = 1,159652\,1869\,(41) \times 10^{-3}$$

a hiba az utolsó két jegyre vonatkozik

$$a_e^{\text{elm}} = 1,159652\,1874\,(6) \times 10^{-3}$$

Az egyezés csodálatos. Innen megkaphatjuk az egyik legpontosabb értéket a finomszerkezeti állandóra:

$$\alpha^{-1}(a_e) = 137,03599875$$



A müon anomális mágneses momentumának kiszámításához már az egész Standard Modellt fel kell használni, a mérés is nehezebb, hiszen a müon idővel elbomlik. A legújabb kísérleti eredmény:

$$a_{\mu}^{\text{kis}} = 11659203 (8) \times 10^{-10}$$

$$a_{\mu}^{\text{elm}} = 11659192,7 (10) \times 10^{-10}$$

Ez az eredmény még további ellenőrzésre vár, mivel az erős kölcsönhatások járulékának számolása, amely az utolsó két jegyet érinti, még további pontosítást igényel.

Ez a csodálatos, sehol máshol el nem ért egyezés adja a részecskefizikusok bizalmát a kvantum-térelmélet hatékonyságában, és abban, hogy ez az elmélet alkalmas a való világ leírására.

**Az elektron anomális mágneses momentuma:**

$$a_e^{\text{kis}} = 1,159652 1869 (41) \times 10^{-3}$$

$$a_e^{\text{elm}} = 1,159652 1874 (6) \times 10^{-3}$$

**A müon anomális mágneses momentuma:**

$$a_{\mu}^{\text{kis}} = 1,1659203 (41) \times 10^{-3}$$

$$a_{\mu}^{\text{elm}} = 1,159652 1874 (6) \times 10^{-3}$$

Míg a kvantum-színdinamika és a kvantumelektrodinamika esetében az erős közvetítő részecskék nyugalmi tömege nulla, a gyenge kölcsönhatások teljesen más jellegűek.

A gyenge kölcsönhatásokat közvetítő részecskék, a  $W^+$ ,  $W^-$  és  $Z^0$  **bozonok** rendkívül nagy tömegűek, ezért a kölcsönhatás rendkívül rövid hatótávolságú és igen gyenge,

$$M_W = 80,43 \text{ GeV} \sim 80m_p, M_Z = 91,2 \text{ GeV} \sim 91m_p,$$

mégis jelentős szerepet játszik a részecskék életében. A gyenge kölcsönhatás nem tiszteli az erősen kölcsönható részecskék egyéniségét. Egy ritka kvark például nem tud erősen elbomlani, de gyengén elbomolhat u vagy d kvarkká  $W$  bozont bocsátva ki, hasonlóan bomlik a d kvark u kvarkba  $W$  bozon kibocsátásával. A  $W$  bozon ezután egy lepton (például elektron) és a megfelelő neutrínó partnerébe ( $\bar{\nu}_e$ ) bomolhat.

A neutron bomlása ezért:

$$udd \rightarrow udu + W \rightarrow udu + e^- + \bar{\nu}_e$$

A **gyenge kölcsönhatás** következtében a világban csak a legkönnyebb kvarkokból alkotott részecskéket és a legkönnyebb leptont, az elektront találhatjuk meg. A müon is elbomlik gyengén a

$$\mu \rightarrow e + \bar{\nu}_e + \nu_{\mu}$$

folyamatban.

**Elektron-neutrínó:**

az elektron semleges, közel nulla tömegű partnere, csak gyenge kölcsönhatásokban vesz részt. Jele:  $\nu_e$ .

*Elmélet és kísérlet*

**$W^+$ ,  $W^-$ :**

a gyenge kölcsönhatások töltött közvetítő bozonjai. Spinjük egységnyi. Tömegük:  $m_W = 143,367 \times 10^{-27} \text{ kg}$ .

**$Z^0$ :**

a gyenge kölcsönhatások semleges közvetítő bozonja. Spinje egységnyi. Tömege:  $m_Z = 162,5566 \times 10^{-27} \text{ kg}$ .

**Gyenge kölcsönhatás:**

általában a részecskék elbomlását okozó kölcsönhatás. Tipikus példája a radioaktív atommagok  $\beta$ -bomlása, amelynek során a magból elektronok lépnek ki. A gyenge kölcsönhatás közvetítő részecskéi a  $W$  és  $Z$  bozonok. A neutron a gyenge kölcsönhatás következtében protonra, elektronra és anti-elektronneutrínóra bomlik. A kölcsönhatás gyenge és rövid hatótávolságú.

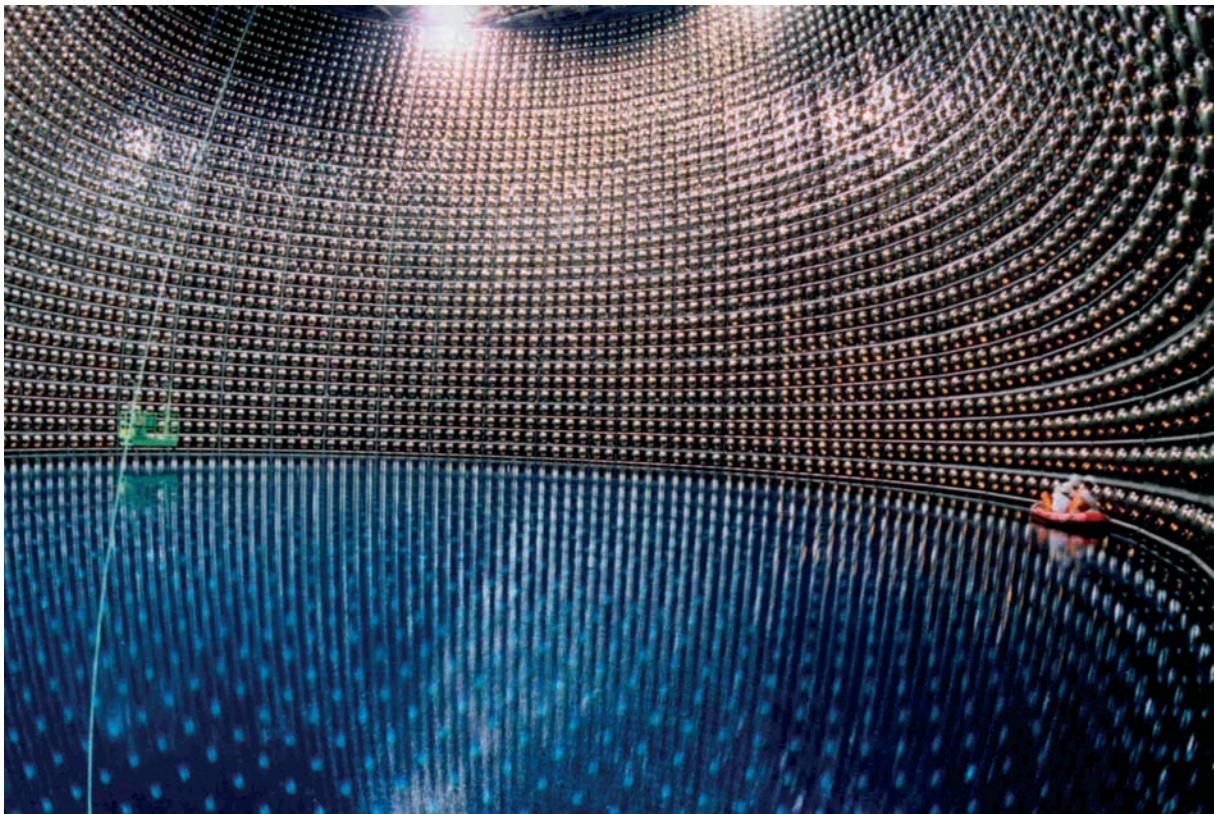
Ezek a folyamatok azonban rendkívül lassúak, mivel a kölcsönhatás igen gyenge. Bizonyos elemek magjainak élettartama a radioaktív  $\beta$ -bomlásra nézve több ezer év is lehet. A szabad neutroné körülbelül tíz perc. A töltött gyengén bomló részecskék nyomát látjuk az emulzióban, buborékkamrában és más eszközökben, mivel nagy sebességük miatt véges hosszúságú nyomot hagynak. A nehezebb gyengén bomló részecskék élettartama kb.  $10^{-8}$  s.

Az elektromágneses kölcsönhatás erősebb, a bomlások során az élettartam kb.  $10^{-16}$  s. Az erősen bomló részecskék kb.  $10^{-22}$  s élettartamúak, így megfigyelésük más módszerekkel történik. A bomlástermékek összenergiáját vizsgálva lehet észrevenni, hogy bizonyos tömegű rövid élettartamú részecskék (*rezonanciák*) keletkeztek.

## A neutrínók mérése és tulajdonságaik

A részecskefizikai világképünk mélyén a kísérleti tapasztalatok állnak. A kísérletek egyre bonyolultabbak és nehezebbek lesznek: egyrészt mivel új eredményeket csak egyre nagyobb energiákon lehet elérni; másrészt a gyenge kölcsönhatásokat érintő eredmények elérése rendkívül nehéz, hiszen ahhoz, hogy elegendő eseményt kapjunk, nagy detektorokat kell építeni, és hosszú ideig kell mérni. Ez utóbbi különösen a neutrínókkal kapcsolatos mérésekre igaz. A Standard Modellben a neutrínókat nulla nyugalmi töme-

*Super-Kamiokande  
(Kamioka Observatory, ICRR,  
University of Tokyo)*



gű részecskékné tekintjük. A neutrínók semleges, gyengén kölcsönható kísérteties részecskék. Minden másodpercben 60 milliárd neutrínó hatol át testünk és minden más tárgy minden négyzetcentiméterén. Mivel azonban igen gyenge a kölcsönhatásuk más részecskékkal, mind a 60 milliárd áthalad anélkül, hogy testünk egyetlen atomját is meglökné. Valójában keresztülhaladhatunk egy ilyen neutrínónyalábot egy fényév vastagságú ólomtömbön, és a legtöbbjük érintetlenül lépne ki belőle. Lehet, hogy mégis van tömegük, és ha van, hogyan lehet ezt kimutatni?

Kamiokában, Japánban, egy bányában egy hatalmas neutrínócsapdát helyeztek el. Azért egy bányában, hogy lehetőleg kiszűrjék az összes zavaró eseményt, amit például a kozmikus sugárzás okozhat. Az eszköz neve Super-Kamiokande. 50 000 tonna tiszta vizet tartalmaz, és a tartály falát sűrűn fényérzékeny detektorok borítják. Ha a neutrínó kölcsönhatásba lép a tartálybeli atommal, akkor a megfelelő partnere keletkezik: elektron-neutrínó esetén elektron, müon-neutrínó esetén müon. A nagy energiájú töltött részecske nagyobb sebességgel halad, mint a vízbeli fénysebesség, ezért a repülőgépeknél ismert hangrobbanáshoz hasonló „fényrobbanás”, **Cserenkov-sugárzás** keletkezik. A detektorok érzékelik a fényt, és a fényeloszlásból meghatározható a részecske energiája, sebessége és sebességének iránya. Az is meghatározható, hogy elektron vagy müon keletkezett. Igen bonyolult kiszámítani, hogy hány müont és elektront várunk, de ezek arányát könnyű megbecsülni. A neutrínók főleg a kozmikus sugárzásban keletkező **pionok** bomlásából érkeznek a csapdába. A pion először müonra és (anti)müon-neutrínóra bomlik, majd a müon tovább bomlik elektronra, (anti)elektron-neutrínóra és müon-neutrínóra. Ezért azt várjuk, hogy a tartályban átlagban kétszer annyi müont észlelünk, mint elektront (hiszen mindegyik neutrínó a saját partnerét kelti az ütközésben). Ezzel szemben csak 1,3-szer több müont észlelték a mérésben. Hová lett a többi müon-neutrínó?

Még érdekesebb volt, ha azt vizsgálták, hogy a müon-neutrínók milyen számban érkeztek a berendezésbe felülről és alulról. Mivel a neutrínók nem nagyon lépnek kölcsönhatásba a Föld anyagával, azt várnánk, hogy ugyanannyi érkezik felülről, mint alulról. Ezzel szemben az alulról érkezők csak feleannyian voltak, mint a felülről érkezők. Mi a különbség? A felülről érkezők sokkal rövidebb utat futottak be a légkörben való keletkezésük után, mint azok, amelyeknek a Földön is át kellett haladni. Mindkét esemény arra utal, hogy a müon-neutrínók egy része eltűnik az útja során.

Ezt azzal az érdekes kvantummechanikai jelenséggel lehet magyarázni, hogy ha a neutrínóknak tömegük van, és a különböző neutrínók tömege picit eltér egymástól, a bomlaskor keletkező neutrínó nem olyan állapotban van, amely tisztán az egyik tömegnek felel meg, a müon-neutrínó például utazása során átalakulhat tau-neutrínóvá és vissza.

Olyan ez, mintha lenne egy ikerpárunk: Péter és Pál, akik csak a tömegükben különböznek egy kicsit. Ha a kvantumelmélet a minket körülvevő világban működne, előfordulhatna, hogy Péter – akinek Anna a barátnője, és ezért jól ismerik egymást – elutazik. Útja során azonban átalakulhat Pállá, és mire hazatér, Anna nem ismer rá. Hiszen valaki visszaérkezett, de az nem Péter.

### Cserenkov-sugárzás:

a speciális relativitáselmélet értelmében a vákuumbeli fénysebességnél ( $c = 299\,792\,458 \text{ ms}^{-1}$ ) gyorsabban semmi sem haladhat vagy terjedhet. Az azonban előfordulhat, hogy egy elektromosan töltött elemi részecske az adott közegben nagyobb sebességgel mozog, mint a közegebeli fénysebesség, ekkor – a hangrobbanáshoz hasonlóan – a részecske fényt sugároz ki, ezt nevezik Cserenkov-sugárzásnak.

### Pion:

a magerőket közvetítő részecske, nulla spinű mezon. Három lehetséges elektromos töltése van:  $\pi^-$ ,  $\pi^0$  és  $\pi^+$ . Ezek a részecskék kvark-antikvark kötött állapotok:  $\bar{u}d$ ,  $\bar{u}u$  +  $\bar{d}d$ ,  $\bar{d}u$  rendre. Tömegük:  $m^+ = m^- = 248,80642(4) \times 10^{-30} \text{ kg}$ ,  $m^0 = 240,61762(5) \times 10^{-30} \text{ kg}$ .

### $\pi^0$ :

semleges pion.



Az SNO-eszköz



A LEP-berendezés

Ez a neutrínókísérlet meglepő magyarázata, melynek az a következménye, hogy a neutrínóknak tömegük van, ami bármennyire kicsi is, fontos szerepet játszik a világegyetem felépítésében, hiszen az összes neutrínótömeg már akkora, hogy az meghaladja a csillagokat alkotó többi anyag össztömegét.

Hasonló méréseket hajtottak végre az SNO (Sudbury Neutrino Observatory) eszközön Kanadában. Itt 1000 tonna nehézvizet használtak, és a Napból érkező neutrínókat vizsgálták. Azt tapasztalták, hogy a Napból érkező elektron-neutrínók egy része eltűnt, de – fajtára való tekintet nélkül – meg tudták mérni az összes neutrínót is, és azt tapasztalták, hogy ezek száma éppen annyi, mint amennyit a Napot leíró modell alapján várnánk.

Jelen mérések alapján:

$$\Delta m^2 = 4,2 \times 10^{-5} \text{ eV}^2 \text{ és } m_0 \sim 10^{-6} m_e > 0 \text{ a jelen kísérletek szerint.}$$

## A részecskefizika »mikroszkópjai«: a gyorsítók

Csak úgy tudunk egyre újabb eredményeket elérni, ha egyre nagyobb energiájú ütköztetéseket hozunk létre. Az ilyen berendezések rendkívül költségesek. Látva az Egyesült Államokban és a Szovjetunióban megindult kísérleti

berendezéseket, 1954-ben tizenkét európai állam egyezményt írt alá egy európai részecskefizikai kutatóközpont létrehozására.

A CERN kutatóközpontot Genf mellett a francia–svájci határ mentén hozták létre. A helyszínválasztásnak geológiai oka is volt, itt találtak ugyanis egy olyan összefüggő geológiai táblát, amelyre a berendezéseket rá lehetett helyezni.

Az együttműködés sikerét mutatja, hogy mára húsz európai ország, többek között hazánk is (1992) csatlakozott ezekhez a kutatásokhoz.

A korábbi nagy tárológyűrűs berendezésen sikerült felfedezni többek között a W és Z bozont 1983-ban, amit Nobel-díjjal jutalmaztak. 2007-re a korábbi LEP-kísérletre megépített 27 km hosszúságú alagútban az új kísérleti berendezést, az LHC-t fogják üzembe helyezni, amelyben 7 TeV energiájú protonnyalábokat kívánnak ütköztetni. (Sebességük a fénysebesség 99,999999 százaléka.) Ahhoz, hogy ilyen nagy energiájú nyalábot eltérítsenek kör alakú pályára, igen nagy mágneses térerősségre van szükség: 8,5 teslára. Az alagútban 1232 darab 15 méter hosszúságú mágnest helyeznek el. A mágneseket szupravezető kábelekből hozzák létre, amelyekben 12 000 A áram folyik, és állandóan  $-271\text{ }^{\circ}\text{C}$  hőmérsékleten tartják. Azt, hogy ilyen mágnesek létrehozhatók és tartósan működtethetők, kísérletileg igazolták 1994-ben.

A nyalábok az alagút négy pontjában fogják metszeni egymást, ahol a részecskék ütközését majd detektorokkal vizsgálják. A cél az, hogy minél több olyan ütközést hozzanak létre, amikor a két protont alkotó kvarkok közül

#### LEP:

a Large Electron-Positron Collider (Nagy Elektron-Pozitron Ütköztető) 1989-ben kezdett el működni a genfi CERN-ben (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire = Európai Atommagkutató Tanács). Elsősorban a W és Z részecskék részletes tanulmányozásában ért el jelentős eredményeket. A berendezést 2000 novemberében bezárták az LHC építése miatt.

#### LHC:

Large Hadron Collider (Nagy Hadron Ütköztető). A LEP 27 km hosszúságú alagútjában készülő proton-proton ütköztető berendezés. Megnyitását 2007-re tervezik.

A CERN elhelyezkedése







egy pár frontálisan ütközik. A kutatók ezeket a nagyenergiás eseményeket kívánják kiszűrni. A nyaláb – mint egy gyöngyfűzér – 25 milliárdod másodpercnyi távolságra levő protoncsomagokból fog állni.

Ezek a csomagok minden ütközési pontnál áthaladnak egymáson: egy másodperc alatt negyvenmilliószor, és minden alkalommal körülbelül húsz ütközés jön létre. Már akkor újabb ütközés jön létre, amikor még az előző ütközés termékei a berendezésen belül repülnek. Így nyolcszázmillió ütközés jön létre másodpercenként, ezek közül azonban csak egymilliárd ütközés közül egyben fordul elő, hogy két kvark frontálisan ütközik.

Hogy ezzel az őrült sebességgel lépést tudjanak tartani, az információt a detektorból olyan elektronikus vonalon küldik tovább, amely elég lassú ahhoz, hogy néhány ezer esemény adatait tárolja. Ez lehetőséget ad a számítógépeknek, hogy eldöntsék, érdekes-e az esemény, és rögzítsék-e, mielőtt a vonal végére érne és elveszne. Az LHC-detektorok egy esemény esetén több tízmillió adatot szolgáltatnak. Megfelelni ennek a feladatnak észbontó követelmény.

Egyidejűleg négy detektor épül: az ATLAS és a CMS 22 méter magas óriások, az ALICE és az LHCb kisebbek. Az egyik CMS-eszköz fejlesztésén jelenleg 36 nemzet, 159 intézet 1940 tudósa dolgozik, köztük hazánk kutatói is.

## A Standard Modell problémái

### Skalár-tér:

olyan tér, melynek kvantumai nulla spinű részecskék. Ilyen például a Higgs-tér.

### Higgs-bozon:

hipotetikus skalár (nulla spinű) részecske, a Standard Modell fontos alkotóeleme.

Az anyagrészecskék tömegének nagyságát a modellben az határozza meg, hogy milyen erősen vannak kölcsönhatásban ezzel a részecskével. A Higgs-bozon tömege nagyobb, mint a proton tömegének százszorosa. Eddig kísérletekben nem sikerült felfedezni.

Mi a célja ezeknek a nagy berendezéseknek? Egyrészt teljessé tenni a Standard Modellt, hiszen van egy-két olyan probléma, amelyre nem sikerült eddig választ adni. Az egyik a részecskék tömegének eredete. A Standard Modell azt feltételezi, hogy van egy **skalár-tér** (nulla spinű), a **Higgs-tér**, és az egyes részecskék tömege attól függ, hogy milyen erősen vannak kölcsönhatásban ezzel a térrel. Eddig azonban a gyorsítóknak nem sikerült megtalálni az ezen térnek megfelelő részecskét. Feltételezések szerint a Higgs-részecske tömege néhány száz GeV ( $m_p$ ), így ha létezik ez a részecske, feltétlenül keletkeznie kell az LHC-energián.

Ha nem a Higgs-részecske, hanem valami más terek okozzák a tömeget, azokat is észlelnünk kell ezen az energián.

Van egy másik fontos alkotóeleme a jövő részecskefizikájának – amit a fizikusok nagyon szeretnének, ha igaz lenne –, ez pedig a szuperszimmetria. A szuperszimmetria azt jelentené, hogy minden részecskének lenne egy partnere. Az anyagrészecskéknek (feles spinű részecskék) bozonikus (egész spinű), az erőt hordozó részecskéknek (egész spinű) fermionikus (feles spinű) a partnere.

Reménykedünk benne, hogy ezeket a részecskéket megtalálják ezen az energián. Ha ez sikerülne, az jelentős mértékben segítené, hogy nagyon nagy energián az összes kölcsönhatás azonos erősségű legyen, azaz létrejöhessen a Nagy Egyesítés. Az ATLAS és a CMS feladata többek között ezeknek a részecskéknek a keresése lesz.

## A részecskefizikai kísérletek »haszna«

Már az LHC-berendezés leírása érzékeltette, hogy milyen szintű technikai nehézségekkel kell megküzdeniük a kísérleti fizikusoknak. A CERN filozófiája az, hogy a kísérleti fejlesztésekhez szükséges berendezéseket lehetőleg a tagállamok cégeitől rendeli meg, ezzel is segítve e cégek fejlődését, és a tagdíjként befolyt tőke visszajuttatását a tagokhoz.

Az LHC esetében az együttműködés túlmutat az európai tagországon, bár ezek előnyös helyzetben maradnak. Rajtuk kívül az összes nagyobb állam tudományos közössége (Kanada, India, Izrael, Japán, Oroszország és az Egyesült Államok) is csatlakozott, és a fejlesztési költségek majdnem 40 százalékát fedezik. Így az LHC az egész világ mérőlaboratóriuma lesz, közel 5000 kutató fog dolgozni a méréseken. A teljes hátralévő költséget 2003 januárjában 3220 millió svájci frankra becsülte az intézet vezető tanácsa.

Az egyik fontos feladat a számítógépes adatfeldolgozás biztonságos megteremtése lesz. A CERN-ből indult ki a keletkező több **Pbyte** – több millió Gbyte – adat feldolgozására való elosztott PC-alapú GRID-technológia megteremtése. Ebben jelentős szerepet vállalnak a magyar kutatók is. Ilyen nagyságrendű adat gyors kezelése lehetővé tenné például olyan részletes egészségügyi adatbázis felépítését, amelyben egy Magyarország méretű ország összes egészségügyi adatai az orvosok számára bárhol azonnal elérhetőek volnának. A különböző vizsgálatok eredményei azonnal kiértékelhetők és a korábbiakkal összevethetők lennének. De fontosak az ilyen számítógépes fürtök az elméleti fizika szempontjából is. Ezeken viszonylag szerényebb költség mellett lehet végrehajtani a szükséges nagy számítógép-kapacitást igénylő számításokat.

Utolsóként említem a CERN-hez kapcsolódó újítást, mely az egész világra hatást gyakorol: a világhálót és a böngésző szoftvert. Ezt a technikát éppen arra fejlesztették ki, hogy az előző LEP-eszköz eredményeit minél könnyebben meg lehessen osztani a résztvevők között. Éppen tíz évvel ezelőtt tette a CERN szabad szoftverre és szabad technológiává ezt az eszközt, melynek megalkotója Tim Berners-Lee, a CERN munkatársa volt.

## Létezik-e a mindenség (»mindentudás«) elmélete?

A Standard Modellnek más hiányosságai is vannak. Nem említettem meg eddig a negyedik erőt, a gravitációt. A gravitáció leírása nem része a Standard Modellnek. Ez a kölcsönhatás olyan gyenge, hogy nem játszik jelentős szerepet a részecskefizikában.

Mint tudjuk, Einstein úgy írta le a gravitációt, hogy az anyag módosítja a téridő geometriáját, és az ebben a módosított, görbült téridőben szabad mozgást végző testek görbült pályán mozognak. Ez a geometriai effektus

### Pbyte:

az 1 byte egy kettes számrendszerbeli nyolcjegyű számnak megfelelő információ. Az SI-rendszernek megfelelően:

1 Kbyte = 1000 byte,

1 Mbyte =  $10^6$  byte,

1 Gbyte =  $10^9$  byte,

1 Tbyte =  $10^{12}$  byte,

1 Pbyte =  $10^{15}$  byte

(K = kilo, M = mega, G = giga, T = tera, P = peta).



Berners-Lee, Tim (1955–)



Planck, Max (1858–1947)

az, amit gravitációs hatásként érzünk. Van azonban egy alapvető gond a gravitáció elméletével: az általános relativitáselmélet nem egyeztethető össze a kvantumelmélettel. Ez okozta azt, hogy Einstein élete végéig idegenkedett a kvantumelméletől. Ha a gravitációt térelméletnek tekintenénk, megalkothatnánk a kvantált gravitációelméletet, amelynek kvantuma a graviton lenne. Ám nemhogy gravitont nem láttak eddig kísérletileg, de még a gravitációs hullámok létezésére is csak indirekt csillagászati bizonyítékaink vannak. Ez magyarázza azt, hogy éppen ebben az évben indultak el olyan újabb mérések, amelyekkel a gravitációs hullámokat szeretnék kimutatni.

Van azonban egy olyan jellemző tömeg-, energia-, hossz- és időérték, amelynek esetén nem lehet eltekinteni a gravitáció és a kvantumelmélet egyidejű alkalmazásától. Ez a Planck-tömeg, a Planck-hossz és a Planck-idő:

$$m_p = \left( \frac{\hbar c}{G} \right)^{\frac{1}{2}} = 2,1767 \times 10^{-8} \text{ kg} = 21,77 \mu\text{g}, \text{ itt } G \text{ a gravitációs állandó.}$$

$$t_p = \left( \frac{\hbar G}{c^5} \right)^{\frac{1}{2}} = 5,4 \times 10^{-44} \text{ s}$$

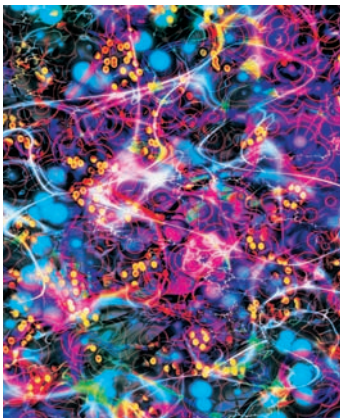
$$l_p = \left( \frac{\hbar G}{c^3} \right)^{\frac{1}{2}} = 1,62 \times 10^{-35} \text{ m}$$

Elvben a Planck-hossz abszolút korlát a téridő értelmes geometriai leírására, ezen túl a téridőtávolságok nem definiálhatók jól a határozatlansági reláció miatt. Ugyanez a helyzet, ha a Planck-tömegnyi anyagot ilyen kis távolságra kívánnánk összepréselni: az egész téridő szétesne.

Roger Penrose az mondja, hogy ennél a határnál a tér szerkezete valamilyen rosszul definiált habszerű állapot, ennek mi csak az átlagát látjuk, mint általában bármilyen más fizikai mennyiség esetében a kvantumelméletben.

Eddig egyetlen olyan elmélet született, amely reménykeltően kívánja egyesíteni a gravitációt és a többi kölcsönhatásokat, ez az úgynevezett szuperhúrelmélet. Ebben az elméletben a különböző részecskék egy Planck-hossz méretű szuperszimmetrikus húr rezgési módusaként írhatók le, többek között a graviton és szuperpartnere, a gravitínó is. Az elmélet jellemzője, hogy a Planck-hossznál kisebb távolságok nem léteznek benne.

Hogy valóban a szuperhúrelmélet vagy továbbfejlesztett változata, az M-elmélet lesz-e a végső egyesített elmélet, a mindenség vagy a „mindentudás” elmélete, azt rövid időn belül nehezen tudjuk eldönteni, hacsak nem találjuk meg ennek az elméletnek azokat a következményeit, amelyek már – mondjuk – az LHC-energiákon megmérhetőek lesznek.



Szuperhúrok

## Ajánlott irodalom

- Csörgő Tamás:* Magyar kutatók részvétele a PHENIX-kísérletben. *Fizikai Szemle*, Vol. 54 (2004) 19.
- Fritzsche, Harald:* Kvarkok. Bp.: Gondolat, 1987.
- Greene, Brian:* Az elegáns Univerzum. (Talentum tudományos könyvtár). Bp.: Akkord, 2003.
- Gyulai József:* Részecskegyorsítóktól a nanotechnológiáig. *Fizikai Szemle*, Vol. 53 (2003) 45.
- Hajdu Csaba:* Az első csöves géptől az LHC gridig. *Fizikai Szemle*, Vol. 53 (2003) 430.
- Hidas Pál:* Mezospektroszkópia a Crystal Barrel-detektorral. *Fizikai Szemle*, Vol. 53 (2003) 359.
- Horváth Dezső:* Higgs-bozonok keresése az OPAL-együttműködésben. *Fizikai Szemle*, Vol. 53 (2003) 364.
- Horváth Dezső:* Szimmetriák az elemi részecskék világában. *Fizikai Szemle*, Vol. 53 (2003) 122.
- Horváth Zalán:* A kvantumelektrodinamika kísérleti bizonyítékai. In: *Fizika 1977*. Bp.: Gondolat, 1978.
- Kiss Dezső:* Bevezetés a kísérleti részecskefizikába. Bp.: Akadémiai K., 1990.
- Lederman, Leon:* Az isteni atom, avagy mi a kérdés, ha a válasz a Világegyetem. Bp.: Typotex, 1995.
- Marx György:* A Napból érkező neutrínókra várva. In: *Fizika 1977*. Bp.: Gondolat, 1978. 91.
- Marx György:* Túl az atomfizikán. Bp.: Gondolat, 1960.
- Molnár József – Fenyvesi András:* Fejlesztések a CMS műondetektorainak helyzetértékelő rendszeréhez. *Fizikai Szemle*, Vol. 54 (2004) 47.
- Nagy Elemér – Tóth József – Urbán László:* Magyar részvétel az Európai Müon- és az L3-együttműködésben. *Fizikai Szemle*, Vol. 53 (2003) 352.
- Palla László:* Mágneses monopólusok. In: *Fizika 1977*. Bp.: Gondolat, 1978. 101.
- Pócsik György:* Az erős kölcsönhatás modern elmélete: kvantum-színdinamika. *Fizikai Szemle*, Vol. 50 (2000) 402.
- Pócsik György:* Részecskefizika az ezredfordulón. *Fizikai Szemle*, Vol. 46 (1996) 67.
- Pócsik György:* Részecskefizika és társadalom. *Ezredforduló*, Vol. 1 (1999) 27.
- Pócsik György:* Részecskefizika itthon és a világban. *Magyar Tudomány*, Vol. 6 (1999) 720.
- Pócsik György:* Tárológyűrűk és ütközősugarak alkalmazása a részecskefizikában. In: *Fizika 1976*. Bp.: Gondolat, 1977. 119.
- Siklér Ferenc:* Hadronfizika az NA49-kísérletnél. *Fizikai Szemle*, Vol. 53 (2003) 369.
- Simonyi Károly:* A fizika kultúrtörténete a kezdetektől 1990-ig. 4., átdolg. kiad. Bp.: Akadémiai K., 1998.
- Szalay A. Sándor:* Neutrínótömeg a kozmológiában. In: *Fizika 1975*. Bp.: Gondolat, 1976. 9.
- Zimányi József:* Magyarország csatlakozása a CERN-hez. *Fizikai Szemle*, Vol. 53 (2003) 351.

